

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
15 décembre 2016 (15.12.2016)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2016/198940 A2

(51) Classification internationale des brevets :

C23C 2/02 (2006.01)	C23C 14/02 (2006.01)
C21D 8/02 (2006.01)	C23C 14/06 (2006.01)
C21D 8/04 (2006.01)	C22C 38/00 (2006.01)
C23C 2/06 (2006.01)	C22C 38/02 (2006.01)
C23C 2/28 (2006.01)	C22C 38/04 (2006.01)
C23C 2/40 (2006.01)	C22C 38/12 (2006.01)
C21D 9/46 (2006.01)	C22C 38/06 (2006.01)
C21D 9/48 (2006.01)	

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/IB2016/000780

(22) Date de dépôt international :

9 juin 2016 (09.06.2016)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

PCT/IB2015/000891 10 juin 2015 (10.06.2015)

IB

(71) Déposant : ARCELORMITTAL [LU/LU]; 24-26 Boulevard d'Avranches, 1160 Luxembourg (LU).

(72) Inventeurs : DRILLET, Josee; 9 chemin de Banauvignes, 57160 Rozerieul (FR). HEBERT, Veronique; 23 rue Charles Louis de France, 57070 Saint Julien Metz (FR).

(74) Mandataire : PLAISANT, Sophie; ArcerlorMittal France - R&D Intellectual Property, 6 rue Campra - Immeuble Le Cézanne, 93200 Saint Denis (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : HIGH-STRENGTH STEEL AND PRODUCTION METHOD

(54) Titre : ACIER À HAUTE RÉSISTANCE ET PROCÉDÉ DE FABRICATION

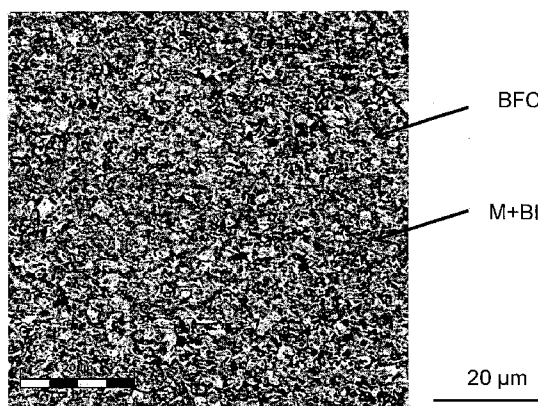


Figure 1

(57) Abstract : The invention relates to a cold-rolled, annealed steel sheet having a thickness of between 0,7 mm and 2mm, a mechanical strength of between 1180 MPa and 1320 MPa, a hole expansion ratio (Ac%) greater than 20%, a bending angle greater than or equal to 40°, and a chemical composition comprising (concentrations expressed by weight): 0.09 < C < 0.11 %, 2.6 ≤ Mn < 2.8 %, 0.20 ≤ Si ≤ 0.55 %, 0.25 ≤ Cr < 0.5 %, 0.025 < Ti ≤ 0.040 %, 0.0015 ≤ B < 0.0025 %, 0.005 ≤ Al < 0.18 %, 0.08 ≤ Mo < 0.15 %, 0.020 < Nb ≤ 0.040 %, 0.002 ≤ N < 0.007 %, 0.0005 % ≤ S ≤ 0.005 %, 0.001 % ≤ P ≤ 0.020 %, Ca ≤ 0.003 %, the remainder comprising iron and inevitable impurities resulting from production. The sheet has a microstructure comprising martensite and/or lower bainite, said martensite comprising fresh martensite and/or self-tempered martensite, the sum of the surface area percentages of martensite and lower bainite being between 40 and 70 %, with between 15 and 45 surface area-% low-carbide-content bainite, between 5 and less than 20 surface area-% ferrite, the fraction of non-recrystallised ferrite in relation to the total ferrite fraction being less than 15 %, and less than 5 surface area-% residual austenite in the form of islets, the fraction of former austenite grains with a size of less than one micrometre representing between 40 and 60 % of the total population of said former austenite grains.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]



LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, **Publiée :**

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée
dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

L'invention a pour objet une tôle d'acier laminée à froid et recuite d'épaisseur comprise entre 0,7 mm et 2mm, de résistance mécanique comprise entre 1180 MPa et 1320 MPa, dont le rapport d'expansion de trou Ac% est supérieur à 20% et l'angle de pliage supérieur ou égal à 40°, dont la composition chimique comprend, les teneurs étant exprimées en poids : $0,09 < C < 0,11$ %, $2,6 \leq Mn < 2,8$ %, $0,20 \leq Si \leq 0,55$ %, $0,25 \leq Cr < 0,5$ %, $0,025 < Ti \leq 0,040$ %, $0,0015 \leq B < 0,0025$ %, $0,005 \leq Al < 0,18$ %, $0,08 \leq Mo < 0,15$ %, $0,020 < Nb \leq 0,040$ %, $0,002 \leq N < 0,007$ %, $0,0005\% \leq S \leq 0,005\%$, $0,001\% \leq P \leq 0,020\%$, $Ca \leq 0,003\%$, le reste étant constitué de fer et d'impuretés inévitables provenant de l'élaboration, la tôle ayant une microstructure constituée de martensite et/ou de bainite inférieure, ladite martensite comprenant de la martensite fraîche et/ou de la martensite auto-revenue, la somme des proportions surfaciques de martensite et de bainite inférieure étant comprise entre 40 à 70 %, de 15 à 45 % en proportion surfacique de bainite à faible quantité de carbures, de 5 à moins de 20% en proportion surfacique de ferrite, la fraction de ferrite non recristallisée par rapport à la fraction de ferrite totale, étant inférieure à 15 %, et de moins de 5 % en proportion surfacique, d'austénite résiduelle sous forme d'îlots, la fraction des anciens grains austénitiques dont la taille est inférieure à moins de un micromètre représentant de 40 à 60 % de la population totale desdits anciens grains austénitiques.

Acier à haute résistance et procédé de fabrication

La présente invention concerne une tôle d'acier laminée à froid et recuite présentant une très haute résistance mécanique et une aptitude à la déformation pour la fabrication de pièces par mise en forme, en particulier dans l'industrie automobile, pour la fabrication d'éléments de structure de caisse d'automobile, et la fabrication d'une telle tôle.

On a développé des aciers ayant un rapport limite d'élasticité/résistance très favorable lors des opérations de formage.

Leur capacité de consolidation est très grande, ce qui permet une bonne répartition des déformations dans le cas d'une collision et l'obtention d'une limite d'élasticité nettement plus importante sur pièce après formage. On peut réaliser ainsi des pièces aussi complexes qu'avec des aciers conventionnels, mais avec des propriétés mécaniques plus élevées, ce qui autorise une diminution d'épaisseur pour tenir un cahier des charges fonctionnel identique. De la sorte, ces aciers sont une réponse efficace aux exigences d'allègement et de sécurité des véhicules.

Notamment, des aciers dont la structure comprend de la martensite, éventuellement de la bainite, au sein d'une matrice ferritique, ont connu un grand développement car ils allient une résistance élevée à des possibilités importantes de déformation.

Les exigences récentes d'allègement et de réduction de la consommation d'énergie ont conduit à une demande accrue d'aciers à très haute résistance, dont la résistance mécanique R_m est supérieure à 1180 MPa.

Outre ce niveau de résistance, ces aciers doivent présenter une bonne ductilité, une bonne soudabilité et une bonne aptitude au revêtement, notamment une bonne aptitude à la galvanisation en continu au trempé.

Ces aciers doivent également présenter une limite d'élasticité et un allongement à la rupture élevés ainsi qu'une bonne aptitude à la mise en forme.

En effet, certaines pièces automobiles sont fabriquées par des opérations de mise en forme combinant différents modes de déformation. Certaines caractéristiques microstructurales de l'acier peuvent se révéler bien adaptées à un mode de déformation, mais peu favorables vis-à-vis d'un autre mode. Certaines parties des pièces doivent présenter une haute résistance à l'allongement et/ou une bonne aptitude au pliage et/ou une bonne aptitude à la mise en forme d'un bord découpé, notamment lors d'une mise en forme avec bords repoussés.

Cette aptitude à la mise en forme d'un bord découpé est évaluée par détermination d'un rapport d'expansion de trou, noté Ac%. Ce rapport mesure l'aptitude de l'acier à subir une expansion lors d'un emboutissage à froid et fournit donc une évaluation de l'aptitude à la mise en forme dans ce mode de déformation.

5 Le rapport d'expansion de trou peut être évalué de la façon suivante : après réalisation d'un trou par découpe dans une tôle, on utilise un outil tronconique de façon à réaliser une expansion au niveau des bords de ce trou. C'est au cours de cette opération que l'on peut observer un endommagement précoce au voisinage des bords du trou lors de l'expansion, cet endommagement s'amorçant sur des particules de seconde phase ou
10 aux interfaces entre les différents constituants microstructuraux dans l'acier.

D'après les documents US 2012/0312433 A1 et US 2012/132327 A1, on connaît des aciers dont la résistance mécanique Rm est supérieure à 1180 MPa. Néanmoins, cette résistance mécanique est obtenue au détriment de l'aptitude à la mise en forme et de la soudabilité.

15 Par ailleurs, d'après les documents US 2013/0209833 A1, US 2011/0048589 A1, US 2011/01683000 A1 et WO 2013/144376 A1, on connaît des aciers ayant une résistance mécanique élevée pouvant dépasser 1000 MPa, mais ne présentant pas simultanément une aptitude à la mise en forme et une soudabilité satisfaisants.

Dans ces conditions, un but de l'invention consiste à mettre à disposition une tôle
20 d'acier présentant une résistance mécanique élevée, notamment comprise entre 1180 et 1320 MPa, conjointement avec une limite d'élasticité élevée, notamment comprise entre 750 et 970 MPa, cette valeur étant déterminée avant toute opération de skin-pass sur la tôle, une bonne aptitude à la mise en forme, notamment un rapport d'expansion de trou Ac% supérieur ou égal à 20%, un angle de pliage, pour une tôle d'épaisseur comprise
25 entre 0,7 mm et 2mm, supérieur ou égal à 40°, et un allongement à rupture supérieur à 7%.

A cet effet, l'invention a pour objet une tôle d'acier laminée à froid et recuite d'épaisseur comprise entre 0,7 mm et 2mm, de résistance mécanique comprise entre 1180 MPa et 1320 MPa, dont le rapport d'expansion de trou Ac% est supérieur à 20% et
30 l'angle de pliage supérieur ou égal à 40°, dont la composition chimique comprend, les teneurs étant exprimées en poids : $0,09 \leq C \leq 0,11 \%$, $2,6 \leq Mn \leq 2,8\%$, $0,20 \leq Si \leq 0,55\%$, $0,25 \leq Cr < 0,5 \%$, $0,025 \leq Ti \leq 0,040 \%$, $0,0015 \leq B \leq 0,0025 \%$, $0,005 \leq Al \leq 0,18 \%$, $0,08 \leq Mo \leq 0,15 \%$, $0,020 \leq Nb \leq 0,040\%$, $0,002 \leq N \leq 0,007 \%$, $0,0005\% \leq S \leq 0,005\%$, $0,001\% \leq P \leq 0,020\%$, $Ca \leq 0,003\%$, le reste étant constitué de fer et
35 d'impuretés inévitables provenant de l'élaboration, la tôle ayant une microstructure constituée de martensite et/ou de bainite inférieure, ladite martensite comprenant de la

martensite fraîche et/ou de la martensite auto-revenue, la somme des proportions surfaciques de martensite et de bainite inférieure étant comprise entre 40 à 70%, de 15 à 45% en proportion surfacique de bainite à faible quantité de carbures, de 5 à moins de 20% en proportion surfacique de ferrite, la fraction de ferrite non recristallisée par rapport à la fraction de ferrite totale, étant inférieure à 15%, et de moins de 5% en proportion surfacique d'austénite résiduelle sous forme d'îlots, la fraction des anciens grains austénitiques dont la taille est inférieure à moins de un micromètre représentant de 40 à 60% de la population totale desdits anciens grains austénitiques.

Dans des modes de réalisation, la tôle suivant l'invention comporte en outre une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- la microstructure comprend, en proportion surfacique, de 15 à 45% de martensite fraîche.
- la microstructure comprend, en proportion surfacique, de 5 à 50% de somme de martensite auto-revenue et de bainite inférieure.
- la martensite auto-revenue et ladite bainite inférieure contiennent des carbures sous forme de bâtonnets orientés dans les directions $\langle 111 \rangle$ des lattes martensitiques et bainitiques.
- la bainite à faible quantité de carbures contient moins de 100 carbures par unité de surface de 100 micromètres carrés.
- la tôle d'acier contient des précipités du type $(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Mo})(\text{C}, \text{N})$ de taille inférieure à 5 nanomètres, présents en quantité inférieure à $10\,000\text{ précipités}/\mu\text{m}^3$
- la composition chimique comprend, la teneur étant exprimée en poids : $2,6 \leq \text{Mn} \leq 2,7\%$.
- la composition chimique comprend préférentiellement, la teneur étant exprimée en poids : $0,30 \leq \text{Si} \leq 0,5\%$.
- selon un mode préférentiel, la composition chimique comprend, la teneur étant exprimée en poids : $0,005 \leq \text{Al} \leq 0,030\%$.
- la tôle comporte un revêtement de zinc ou d'alliage de zinc, obtenu au trempé.
- selon un mode particulier, le revêtement de zinc ou d'alliage de zinc est un revêtement galvanisé-allié, le revêtement de zinc ou d'alliage de zinc comprenant de 7 à 12% en poids de fer.
- la tôle d'acier comporte un revêtement de zinc ou d'alliage de zinc, obtenu par dépôt sous vide.

L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'une tôle laminée à froid et recuite, revêtue de zinc ou d'un alliage de zinc, selon l'une quelconque des caractéristiques ci-dessus, comprenant les étapes successives suivantes :

- on approvisionne un demi-produit dont la composition chimique comprend, les teneurs étant exprimées en poids : $0,09 \leq C \leq 0,11 \%$, $2,6 \leq Mn \leq 2,8\%$, $0,20 \leq Si \leq 0,55\%$, $0,25 \leq Cr < 0,5 \%$, $0,025 \leq Ti \leq 0,040 \%$, $0,0015 \leq B \leq 0,0025 \%$, $0,005 \leq Al \leq 0,18 \%$, $0,08 \leq Mo \leq 0,15 \%$, $0,020 \leq Nb \leq 0,040\%$, $0,002 \leq N \leq 0,007 \%$, $0,0005 \leq S \leq 0,005\%$, $0,001 \leq P \leq 0,020\%$, $Ca \leq 0,003\%$, le reste étant constitué de fer et d'impuretés inévitables provenant de l'élaboration, puis

- on chauffe le demi-produit à une température T_r supérieure ou égale à 1250°C ,

- puis on lamine à chaud le demi-produit, la température de fin de laminage étant supérieure à la température Ar_3 de début de transformation de l'austénite au refroidissement, pour obtenir une tôle laminée à chaud, puis

- on refroidit la tôle laminée à chaud à une vitesse supérieure à 30°C/s pour éviter la formation de ferrite et de perlite, puis

- on bobine la tôle laminée à chaud à une température comprise entre 580° et 500°C , puis

- on lamine à froid la tôle laminée à chaud pour obtenir une tôle laminée à froid, puis

- on réchauffe la tôle laminée à froid entre 600°C et Ac_1 , Ac_1 désignant la température de début de transformation austénitique au chauffage, avec une vitesse de réchauffage V_c comprise entre 1 et 20°C/s ,

- on porte la tôle laminée à froid jusqu'à une température T_m comprise entre 780°C et $(Ac_3-25^\circ\text{C})$, et on maintient à la température T_m la tôle laminée à froid pendant une durée D_m comprise entre 30 et 150 secondes, étant entendu que Ac_3 désigne la température de fin de transformation austénitique au chauffage, puis

- on refroidit la tôle à une vitesse VR_1 comprise entre 10 et 150°C/s jusqu'à une température T_e comprise entre 400 et 490°C , puis

- on maintient la tôle à la température T_e pendant une durée D_e comprise entre 5 et 150 secondes, puis

- on revêt la tôle par passage en continu en immersion dans un bain de zinc ou en alliage de zinc à une température T_{Zn} comprise entre 450°C et 480°C , lesdites températures T_e et T_{Zn} étant telles que $0^\circ\text{C} \leq (T_e - T_{Zn}) \leq 10^\circ\text{C}$, de façon à obtenir une tôle revêtue, puis

- on réchauffe optionnellement la tôle revêtue à une température T_G comprise entre 490°C et 550°C pendant une durée t_G comprise entre 10 s et 40 s.

L'invention a également pour objet un procédé de fabrication d'une tôle laminée à froid et recuite, comprenant les étapes successives suivantes :

- on approvisionne un demi-produit dont la composition chimique comprend, les teneurs étant exprimées en poids : $0,09 \leq C \leq 0,11 \%$, $2,6 \leq Mn \leq 2,8\%$, $0,20 \leq Si \leq 0,55\%$, $0,25$

5

$\leq \text{Cr} < 0,5 \%$, $0,025 \leq \text{Ti} \leq 0,040 \%$, $0,0015 \leq \text{B} \leq 0,0025 \%$, $0,005 \leq \text{Al} \leq 0,18 \%$, $0,08 \leq \text{Mo} \leq 0,15 \%$, $0,020 \leq \text{Nb} \leq 0,040\%$, $0,002 \leq \text{N} \leq 0,007 \%$, $0,0005 \leq \text{S} \leq 0,005\%$, $0,001 \leq \text{P} \leq 0,020\%$, $\text{Ca} \leq 0,003\%$, le reste étant constitué de fer et d'impuretés inévitables provenant de l'élaboration, puis

5 - on chauffe le demi-produit à une température T_r supérieure ou égale à 1250°C , puis

 - on lamine à chaud le demi-produit, la température de fin de laminage étant supérieure à Ar_3 , pour obtenir une tôle laminée à chaud, puis

10 - on refroidit la tôle laminée à chaud à une vitesse supérieure à 30°C/s pour éviter la formation de ferrite et de perlite, puis

 - on bobine la tôle laminée à chaud à une température comprise entre 580 et 500°C , puis

 - on lamine à froid la tôle laminée à chaud pour obtenir une tôle laminée à froid, puis

15 - on réchauffe la tôle laminée à froid avec une vitesse de réchauffage VR , entre 600°C et Ac_1 , Ac_1 désignant la température de début de transformation austénitique au chauffage, comprise entre 1 et 20°C/s , puis

20 - on réchauffe la tôle laminée à froid jusqu'à une température T_m comprise entre 780°C et $(\text{Ac}_3 - 25^\circ\text{C})$, et on maintient à la température T_m la tôle laminée à froid pendant une durée D_m comprise entre 30 et 150 secondes, étant entendu que Ac_3 désigne la température de fin de transformation austénitique au chauffage, puis

 - on refroidit la tôle à une vitesse VR_2 comprise entre 10 et 100°C/s jusqu'à une température T_e comprise entre 400°C et 490°C , puis

 - on maintient la tôle à la température T_e pendant une durée D_e comprise entre 5 et 150 secondes, puis

25 - on refroidit la tôle jusqu'à la température ambiante.

Dans des modes particuliers de réalisation, ce dernier procédé comporte en outre une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

 - on effectue en outre un revêtement de zinc ou d'alliage de zinc par dépôt sous vide après l'étape de refroidissement jusqu'à la température ambiante.

30 - le dépôt sous vide est effectué par dépôt physique en phase vapeur (PVD).

 - le dépôt sous vide est effectué par Jet Vapour Deposition (JVD).

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au cours de la description ci-dessous, donnée à titre d'exemple et faite en référence aux figures annexées ci-jointes parmi lesquelles :

35 - la Figure 1 présente la microstructure d'une tôle d'acier selon l'invention, mise en évidence par un premier type d'attaque métallographique.

- la Figure 2 présente la microstructure de la tôle d'acier de la Figure 1, mise en évidence par un deuxième type d'attaque métallographique.

- La figure 3 présente un exemple de précipitation de carbonitrides de (Ti, Nb, Mo)(C, N) dans une tôle selon l'invention, observée en microscopie électronique à transmission.

- La figure 4 présente un exemple de précipitation de carbonitrides de (Ti, Nb, Mo)(C,N) ne correspondant pas à l'invention, observée en microscopie électronique à transmission.

On désignera par ailleurs par Ac1 la température de début de transformation allotropique au chauffage de l'acier.

On désignera par Ac3 la température de fin de transformation austénitique au chauffage.

On désignera par Ar3 la température de début de transformation de l'austénite au refroidissement.

On désignera par Ms la température de début de transformation martensitique.

La microstructure de la tôle selon l'invention comprend de la martensite. Celle-ci est issue d'une transformation sans diffusion de l'austénite γ en dessous de la température de début de transformation martensitique Ms au refroidissement.

La martensite se présente sous la forme de fines lattes allongées dans une direction, et orientées à l'intérieur de chaque grain initial d'austénite. Sous le terme martensite, on inclut à la fois la martensite fraîche et la martensite auto-revenue. On distinguera par la suite la martensite auto-revenue de la martensite fraîche, c'est-à-dire non revenue et non auto-revenue.

Notamment, la martensite auto-revenue se présente sous la forme de fines lattes comprenant des carbures de fer dispersés dans ces lattes, sous forme de bâtonnets orientés selon les directions $\langle 111 \rangle$ de la maille α' des lattes. Cette martensite auto-revenue est formée par précipitation des carbures de fer en-dessous de la température de transformation martensitique Ms lorsque le refroidissement n'est pas suffisamment lent pour produire de la martensite fraîche. Au contraire, la martensite fraîche ne comprend pas de carbures.

La bainite, formée lors d'un refroidissement depuis le domaine austénitique, au-dessus de la température de début de transformation martensitique Ms, se présente sous la forme d'un agrégat de lattes de ferrite et de particules de cémentite. Sa formation fait intervenir une diffusion à courte distance.

On distinguera par la suite la bainite inférieure de la bainite à faible quantité de carbures. La bainite inférieure est formée, lors du refroidissement, dans une gamme de

températures immédiatement au dessus de la température de transformation martensitique Ms. Elle se présente sous forme de fines lattes et comprend des carbures dispersés dans ces lattes.

Par ailleurs, on appellera bainite à faible quantité de carbures, de la bainite contenant moins de 100 carbures par unité de surface de 100 micromètres carrés. La bainite à faible quantité de carbures est formée, lors du refroidissement, entre 550°C et 450°C. Au contraire de la bainite à faible quantité de carbures, la bainite inférieure contient toujours plus de 100 carbures par unité de surface de 100 micromètres carrés.

Dans la composition chimique de l'acier de l'invention, le carbone joue un rôle sur la formation de la microstructure et sur les propriétés mécaniques.

La teneur en poids en carbone est comprise entre 0,09% et 0,11%. Cette gamme de teneur en carbone contribue à obtenir simultanément une résistance mécanique supérieure à 1180 MPa, un allongement à la rupture supérieur à 7%, et un rapport d'expansion de trou Ac% satisfaisant, supérieur ou égal à 20%. Notamment, une teneur en carbone inférieure à 0,09% ne permet pas d'atteindre une résistance mécanique suffisante. Pour une teneur en carbone plus élevée, supérieure à 0,11%, l'aptitude au soudage tend à diminuer et la température Ms est abaissée, de telle sorte que la fraction de martensite fraîche dans la microstructure, tend à augmenter et ainsi à dégrader le rapport d'expansion de trou.

La teneur en poids en manganèse est comprise entre 2,6% et 2,8%. Le manganèse est un élément gammagène qui abaisse la température Ac3 et la température Ms de début de formation de la martensite. La faible teneur en carbone de l'acier pourrait conduire à une température Ac3 élevée, supérieure à 860°C. Une teneur en manganèse supérieure à 2,6% permet, en abaissant la valeur de la température Ac3, d'obtenir une austénisation complète de l'acier entre 840°C et 855°C environ, après un maintien à cette température pendant une durée d'au moins 30s. Le manganèse permet par ailleurs la formation de martensite auto-revenue et contribue donc à obtenir un rapport d'expansion de trou Ac% supérieur ou égal à 20%. La teneur en poids en manganèse est limitée à 2,8% afin de limiter la formation de structures en bandes, et préférentiellement comprise entre 2,6 et 2,7%.

Le silicium est un élément participant au durcissement en solution solide, dont la teneur en poids dans l'acier est comprise entre 0,20% et 0,55% en poids, de préférence entre 0,30% et 0,5%. Une teneur d'au moins 0,30% permet d'obtenir un durcissement suffisant de la ferrite et/ou de la bainite. La teneur en poids en silicium est limitée à 0,55% pour garantir un rapport d'expansion de trou Ac% supérieur ou égal à 20%, en limitant la formation de bainite supérieure. En outre, une augmentation de la teneur en silicium

dégrade l'aptitude au revêtement de l'acier en favorisant la formation d'oxydes adhérents à la surface de la tôle. Une teneur en silicium inférieure à 0,55% contribue également à assurer une bonne aptitude au soudage.

Le silicium est un élément alphagène et contribue à élever la température Ac_3 et à favoriser la formation de bainite à faible quantité de carbures. Une teneur en silicium inférieure à 0,55% contribue ainsi à éviter la formation d'une quantité trop importante de bainite à faible quantité de carbures.

La composition de la tôle en acier comporte par ailleurs du chrome en quantité supérieure ou égale à 0,25 % en poids, de façon à améliorer la trempabilité de l'acier, et à augmenter sa dureté ainsi que sa résistance mécanique. La teneur en chrome doit être inférieure à 0,5%, de façon à conserver un allongement à la rupture satisfaisant et à limiter les coûts de fabrication.

Le titane est présent dans l'acier en quantité comprise entre 0,025% et 0,040% en poids. En quantité comprise entre 0,025 et 0,040%, le titane se combine notamment à l'azote et au carbone pour précipiter sous forme de nitrures et/ou de carbonitrures. En deçà de 0,025%, il existe un risque que la résistance mécanique de 1180 MPa ne soit pas atteinte.

Au-delà d'une teneur en titane de 0,040%, il existe un risque de former des nitrures de titane grossiers précipités dès l'état liquide, qui tendent à réduire la ductilité, et à conduire à un endommagement précoce lors de l'expansion de trou. En effet, lorsque des nitrures de taille supérieure à 6 micromètres sont présents, on constate que ceux-ci sont majoritairement à l'origine des décohésions avec la matrice lors des étapes de découpe et d'emboutissage. Le titane permet par ailleurs de faire en sorte que l'azote soit entièrement combiné sous forme d'une précipitation durcissante, si bien que le bore se trouve sous forme libre et peut jouer un rôle efficace sur la trempabilité. Le titane est en quantité surstoechiométrique par rapport à l'azote, si bien que le rapport : Ti/N est supérieur à 3,42.

La teneur en poids en bore est comprise entre 0,0015% et 0,0025%. En limitant l'activité du carbone, le bore permet en effet de contrôler et de limiter les transformations de phase diffusives (transformation ferritique ou perlitique lors du refroidissement) et de former des phases durcissantes (bainite ou martensite) nécessaires à l'obtention de hautes caractéristiques de résistance mécanique. L'ajout de bore permet par ailleurs de limiter l'addition d'éléments trempants tels que Mn, Mo, Cr et de réduire le coût analytique de la nuance d'acier. Selon l'invention, la teneur minimale en bore pour assurer une trempabilité efficace est de 0,0015%. Au delà de 0,0025%, l'effet sur la trempabilité est saturé et on constate un effet néfaste sur la revêtabilité et sur la ductilité.

La composition de la tôle en acier comporte également du molybdène, en quantité comprise entre 0,08 et 0,15% en poids. Le molybdène joue, comme le chrome, un rôle efficace sur la trempabilité, en teneur supérieure à 0,08%.

Une teneur supérieure à 0,15% de molybdène retarde la recristallisation de la ferrite. La résistance mécanique R_m est alors trop élevée, supérieure à 1320 MPa, ce qui se traduit conjointement par une baisse de ductilité.

Lorsque la température de recuit est inférieure à ($Ac3-25^{\circ}C$), une addition dans les conditions de l'invention permet d'obtenir, en combinaison avec le titane et le niobium, une précipitation nanométrique de carbonitrides de molybdène, titane et Niobium (Ti, Nb, Mo)(C,N) qui contribue au durcissement et permet d'obtenir une résistance R_m supérieure ou égale à 1180 MPa après recuit.

Mais une précipitation trop dense de composés de petite taille conduit à un durcissement excessif : lorsque la densité de précipités de taille inférieure à 5 nanomètres excède 10 000 précipités/ μm^3 , la résistance R_m peut excéder 1320 MPa et l'aptitude à la déformation à froid devient insuffisante.

Une addition de molybdène en quantité prévue par l'invention, permet d'obtenir une tôle d'acier moins sensible à des fluctuations éventuelles dans les étapes qui suivent le recuit à la température T_m . En effet, bien que la vitesse de refroidissement VR et la température T_e soient contrôlées dans des conditions industrielles de façon continue en fonction de points de consigne définis, une fluctuation légère de ces paramètres peut intervenir parfois de façon transitoire. Il importe que ces fluctuations n'aient pas d'incidence sur les caractéristiques du produit final. Dans la gamme définie par l'invention, des fluctuations modérées de VR ou de T_e , par exemple de 7%, conduisent à une variation de résistance mécanique R_m inférieure à 7%.

La composition chimique de la tôle d'acier laminée à chaud comporte du niobium, avec une teneur en poids comprise entre 0,020 et 0,040%. En quantité supérieure à 0,020%, le niobium permet d'obtenir une augmentation de la résistance R_m . Au delà d'une teneur en poids de 0,040%, la recristallisation de l'austénite est retardée. La structure contient alors une fraction significative de grains allongés, ce qui ne permet plus d'atteindre le rapport d'expansion de trou Ac% visé.

En outre, la teneur en poids de l'azote est comprise entre 0,002% et 0,007%. Afin de former une quantité suffisante de nitrures et de carbonitrides, la teneur en azote doit être supérieure à 0,002%. La teneur en azote doit être inférieure à 0,007% dans le but d'éviter une précipitation de nitrures de bore, ce qui diminuerait la quantité de bore libre.

Une teneur en poids en aluminium comprise entre 0,005% et 0,18 % permet d'assurer la désoxydation de l'acier pendant sa fabrication. Une teneur en aluminium doit

être inférieure à 0,18%, voire inférieure à 0,030% pour éviter une élévation de la température Ac3 et éviter la formation de ferrite lors du refroidissement.

La teneur en soufre doit être inférieure à 0,005%. Au-delà de cette teneur, la ductilité est réduite en raison de la présence excessive de sulfures tels que MnS qui diminuent l'aptitude à la déformation, en particulier le rapport d'expansion de trou Ac%. L'obtention de teneur en soufre extrêmement réduite, inférieure à 0,0005%, est cependant très coûteuse, sans avantage significatif au regard aux coûts de fabrication. D'un point de vue pratique, une teneur en soufre non inférieure à 0,0005% peut donc être retenue.

La teneur en phosphore doit être inférieure à 0,020%. En effet, le phosphore est un élément qui confère un durcissement par solution solide mais qui diminue la soudabilité par points et la ductilité à chaud, particulièrement en raison de son aptitude à la ségrégation aux joints de grains ou à la co-ségrégation avec le manganèse.

L'obtention de teneur en phosphore extrêmement réduite, inférieure à 0,001%, est cependant très coûteuse, sans avantage significatif au regard aux coûts de fabrication. D'un point de vue pratique, une teneur en phosphore non inférieure à 0,001% peut donc être retenue.

En quantité inférieure à 0,003%, le calcium permet d'éviter la présence d'inclusions allongées, notamment de sulfures, qui influencent défavorablement la ductilité.

Dans la microstructure de la tôle d'acier selon l'invention, la somme des proportions surfaciques de martensite et de bainite inférieure est comprise entre 40 à 70%. La microstructure contient également, en proportion surfacique, de 15 à 45% de bainite à faible quantité de carbures, de 5 à moins de 20% de ferrite, et moins de 5% d'austénite résiduelle sous forme d'îlots. La fraction surfacique de ferrite non recristallisée par rapport à la fraction de ferrite totale, est inférieure à 15%, ce qui permet d'obtenir simultanément une résistance Rm compris entre 1180 et 1320 MPa, un allongement supérieur à 7% et un rapport d'expansion de trou supérieur ou égal à 20%.

Comme on l'a indiqué précédemment, on distingue la martensite auto-revenue de la martensite fraîche, c'est-à-dire non revenue et non auto-revenue.

Selon un mode de réalisation, la martensite est formée notamment de martensite auto-revenue, le pourcentage surfacique de la somme de la martensite auto-revenue et de la bainite inférieure représentant au moins 5% de l'ensemble de la microstructure, cette proportion pouvant aller jusqu'à 50%.

La martensite auto-revenue et la bainite inférieure sont présentes sous la forme de fines lattes, et comprennent des carbures dispersés dans ces lattes. En particulier, la martensite auto-revenue et la bainite inférieure comprennent des carbures de fer Fe₂C et

Fe₃C sous forme de bâtonnets orientés dans les directions <111> de la maille des lattes martensitiques et bainitiques. Les pourcentages de martensite auto-revenue et de bainite inférieure sont spécifiés conjointement car la martensite auto-revenue et la bainite inférieure ont sensiblement le même rôle sur les propriétés d'usage de l'acier. De plus, ces deux constituants, présents sous forme de fines lattes, ne peuvent être identifiés individuellement l'un de l'autre lors d'observations en microscopie électronique à balayage. Seuls des examens en microscopie électronique à transmission permettent de distinguer ces deux constituants.

Un pourcentage surfacique de la somme de martensite auto-revenue et de bainite inférieure compris entre 40% et 70% permet de favoriser l'aptitude à la mise en forme de l'acier, notamment son aptitude au pliage et son aptitude à la mise en forme d'un bord découpé. Un pourcentage de martensite auto-revenue et de bainite inférieure d'au moins 40% contribue ainsi à obtenir un angle de pliage satisfaisant, notamment un angle de pliage pour des tôles d'épaisseur comprise entre 0,7 mm et 2 mm, d'au moins 40°, et un rapport d'expansion de trou Ac% supérieur ou égal à 20%.

Le pourcentage de la somme de martensite auto-revenue et de bainite inférieure dans la microstructure doit être inférieur à 70% afin de conserver un pourcentage suffisant de bainite à faible quantité de carbures, permettant d'obtenir un allongement à la rupture d'au moins 7%.

La martensite peut par ailleurs comprendre en partie de la martensite fraîche dans un pourcentage surfacique compris entre 15 et 45% de l'ensemble de la microstructure. Le pourcentage surfacique de martensite fraîche doit être inférieur à 45%, en particulier pour ne pas diminuer la ductilité de l'acier et pour assurer un bon rapport d'expansion de trou.

La microstructure comprend en outre, en proportion surfacique, de 15 à 45% de bainite à faible quantité de carbures. Celle-ci est formée lors du refroidissement après le recuit à la température T_m, et lors du maintien entre 550°C et 450°C. Sa formation est favorisée notamment grâce à l'addition de silicium qui tend à retarder la précipitation des carbures, conjointement avec une faible quantité d'éléments trempants tels que le carbone ou le manganèse.

La bainite à faible quantité de carbures permet d'augmenter l'allongement à la rupture. En particulier, un pourcentage surfacique de bainite à faible quantité de carbures d'au moins 15% permet d'obtenir un allongement à la rupture d'au moins 7%. Le pourcentage surfacique de bainite à faible quantité de carbures doit être limité à 45% afin de garantir un rapport d'expansion de trou supérieur ou égal à 20% et une résistance mécanique supérieure ou égale à 1180 MPa.

La microstructure comprend par ailleurs de 5 à moins de 20 % de ferrite en proportion surfacique. Si la teneur en ferrite est inférieure à 5%, il existe un risque d'obtenir conjointement trop de martensite autorevenue associée à une limite d'élasticité trop faible. Si la teneur en ferrite excède 20%, il existe un risque que la résistance Rm soit inférieure à 1320 MPa.

La microstructure peut également contenir jusqu'à 5%, en proportion surfacique, d'austénite résiduelle sous la forme d'îlots, formant notamment des plaquettes entre les lattes de martensite auto-revenue et de bainite inférieure.

Par ailleurs, les inventeurs ont également mis en évidence l'importance du contrôle de la taille des grains austénitiques créés lors du recuit de la tôle laminée à froid, c'est-à-dire existant à haute température à l'issue du maintien de recuit, avant le refroidissement ultérieur. Ces grains austénitiques sont qualifiés « d'anciens grains austénitiques », car ces grains sont remplacés par d'autres constituants lors des transformations allotropiques au refroidissement. Comme on va l'expliquer, la taille de ces anciens grains austénitiques peut néanmoins être mise en évidence par différentes méthodes, sur le produit final. Selon l'invention, la fraction des anciens grains austénitiques dont la taille est inférieure à un micromètre, représente entre 40 et 60% de la population totale de ces anciens grains austénitiques.

La fraction des anciens grains austénitiques dont la taille est inférieure à un micromètre est par exemple déterminée au moyen d'un réactif approprié, dont la vitesse d'attaque dépend de certaines ségrégations locales aux anciens joints, tel que par exemple le réactif Béchet-Beaujard, connu en lui-même. A cet effet, un échantillon d'acier à l'état final, c'est-à-dire à l'issue du procédé de fabrication selon l'invention, est attaqué par un réactif approprié, notamment un réactif composé d'une solution aqueuse saturée d'acide picrique additionnée d'au moins 0,5% d'alkylsulfonate de sodium, pendant une durée comprise entre quelques minutes et une heure.

A l'issue de cette attaque, un examen micrographique de l'échantillon permet de visualiser les joints des anciens grains austénitiques, et de réaliser un histogramme de distribution de la taille de ces anciens grains austénitiques, notamment de déterminer la fraction des anciens grains austénitiques dont la taille est inférieure à un micromètre.

Alternativement, la taille des anciens grains austénitiques peut être déterminée au moyen d'une trempe interrompue lors du refroidissement après recuit, en adoptant des conditions de refroidissement initial de façon à provoquer une germination ferritique intergranulaire, puis à interrompre celle-ci par trempe.

Les inventeurs ont mis en évidence que la taille de ces anciens grains d'austénite conditionne la cinétique de transformation de phases lors du refroidissement suivant le

recuit. Notamment, les grains austénitiques de faible taille, inférieure à un micromètre, contribuent à abaisser la valeur de la température M_s et ainsi à augmenter la formation de martensite fraîche.

A l'inverse, la présence de gros grains austénitiques diminue la formation de bainite à faible quantité de carbures.

Une fraction d'anciens grains austénitiques dont la taille est inférieure à un micromètre, comprise entre 40 et 60% de la population totale des grains austénitiques contribue à abaisser la température M_s de transformation martensitique, à éviter la formation d'une proportion trop importante de martensite auto-revenue et de bainite inférieure, ce qui diminuerait l'allongement et la limite d'élasticité.

Les caractéristiques microstructurales présentées ci-dessus sont déterminées par exemple en observant la microstructure par Microscopie Electronique à Balayage au moyen d'un canon à effet de champ (technique « MEB-FEG ») à un grandissement supérieur à 1200x, couplé à un détecteur EBSD (« Electron Backscatter Diffraction »). Les morphologies des lattes et des grains sont ensuite déterminées par analyse d'images au moyen de logiciels connus en eux-mêmes, par exemple le logiciel Aphelion®.

La tôle d'acier laminée à froid et recuite selon l'invention peut être produite nue, sans revêtement, mais elle peut également être revêtue. Par exemple, un tel revêtement peut être formé de zinc ou d'alliage de zinc, notamment un revêtement galvanisé-allié comprenant de 7 à 12% en poids de fer.

Notamment, une telle tôle d'acier est bien adaptée au dépôt d'un revêtement métallique, en particulier par galvanisation au trempé selon les procédés usuels. En particulier, la composition et les caractéristiques mécaniques de l'acier sont compatibles avec les contraintes et les cycles thermiques des procédés de revêtement de zinc au trempé en continu.

Le procédé de revêtement utilisé dépend de l'application visée. Notamment, le revêtement peut être obtenu au trempé, par une technique de dépôt sous vide telle que JVD (« Jet Vapour Deposition »), ou bien par électrodéposition cationique.

Les inventeurs ont mis en évidence le fait qu'une tôle d'acier selon l'invention présente une résistance mécanique comprise entre 1180 et 1320 MPa, conjointement avec une limite d'élasticité comprise entre 750 et 970 MPa, avant toute opération de skin-pass, un allongement à la rupture d'au moins 7%, notamment supérieur à 8%, et un rapport d'expansion de trou $A_c\%$ supérieur ou égal à 20%.

En particulier, une limite d'élasticité comprise entre 800 et 970 MPa est obtenue tout en conservant une résistance mécanique inférieure à 1320 MPa. En outre, une telle

tôle présente un angle de pliage élevé. En particulier, lorsque la tôle a une épaisseur comprise entre 0,7 mm et 2 mm, l'angle de pliage est d'au moins 40°.

La mise en œuvre du procédé de fabrication d'une tôle laminée selon l'invention comporte les étapes successives suivantes :

5 On approvisionne un acier de composition selon l'invention, et on procède à la coulée d'un demi-produit à partir de cet acier. Cette coulée peut être réalisée en lingots ou en continu sous forme de brames d'épaisseur de l'ordre de 200mm.

Les demi-produits coulés sont tout d'abord portés à une température T_R supérieure à 1250 °C, afin d'homogénéiser l'acier et de dissoudre complètement les précipités.

10 Puis, on lamine à chaud le demi-produit dans un domaine de température où la structure de l'acier est totalement austénitique, c'est-à-dire à une température T_{FL} supérieure à la température Ar_3 de début de transformation de l'austénite au refroidissement. Si la température T_{FL} est inférieure à la température Ar_3 , les grains de ferrite sont écrouis par le laminage et la ductilité est réduite. Préférentiellement, on
15 choisira une température de fin de laminage supérieure à 875°C.

La tôle laminée à chaud est refroidie à une vitesse supérieure à 30°C/s pour éviter la formation de ferrite et de perlite, puis la tôle laminée à chaud est bobinée à une température T_{Bob} comprise entre 500°C et 580°C. La température de bobinage doit être inférieure à 580°C pour éviter une oxydation lors du bobinage. Une température de
20 bobinage trop basse, c'est-à-dire inférieure à 500°C, conduit à une augmentation de la dureté de l'acier, ce qui augmente les efforts nécessaires lors du laminage à froid ultérieur. La gamme de température de bobinage permet également d'éviter la formation de perlite.

La tôle est ensuite décapée, par un des procédés connus en eux-mêmes.

25 On effectue ensuite un laminage à froid, avec un taux de réduction par exemple compris entre 40% et 70% de façon à introduire une quantité de déformation permettant une recristallisation ultérieure.

On chauffe ensuite la tôle laminée à froid, préférentiellement au sein d'une installation de recuit continu, avec une vitesse moyenne de chauffage V_C comprise entre
30 1°C/s et 20°C/s entre 600°C et la température Ac_1 (température de début de transformation allotropique en austénite au chauffage).

La température Ac_1 peut être mesurée par dilatométrie, ou évaluée au moyen de la formule suivante publiée dans « Darstellung der Umwandlungen für technische Anwendungen und Möglichkeiten ihrer Beeinflussung », H.P. Hougardy, Werkstoffkunde
35 Stahl Band 1, 198-231, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1984 :

$$Ac_1 = 739 - 22 \cdot C - 7 \cdot Mn + 2 \cdot Si + 14 \cdot Cr + 13 \cdot Mo - 13 \cdot Ni.$$

Dans cette formule, la température Ac1 est exprimée en degrés Celsius, et les teneurs élémentaires de la composition sont exprimées en pourcentages en poids.

Lors du chauffage de l'acier entre 600°C et Ac1, il se produit un début de recristallisation et il se forme des précipités de (TiNbMo)(CN), qui permettent de contrôler la distribution de la taille des grains austénitiques formés à partir de Ac1. D'une manière
5
surprenante, les inventeurs ont mis en évidence le fait que le contrôle de la vitesse moyenne de chauffage V_C entre 600°C et Ac1 et ainsi du temps de chauffage entre 600°C et Ac1, qui correspond au temps entre le début de recristallisation et le début de la transformation de phases, est déterminant pour les cinétiques des transformations de
10
phases ultérieures, notamment lors de l'étape de maintien ultérieure à la température de recuit T_m . Les inventeurs ont ainsi mis en évidence, de manière inattendue, que le choix d'une vitesse moyenne de chauffage V_C entre 600°C et Ac1 comprise entre 1°C/s et 20°C/s permet, à l'issue du procédé de fabrication, d'obtenir un acier dont la microstructure est constituée, en proportion surfacique, de 40 à 70% en somme de
15
martensite et de bainite inférieure, de 15 à 45% de bainite à faible quantité de carbures, de 5 à moins de 20 % de ferrite, et de moins de 5% d'austénite résiduelle sous forme d'îlots.

Notamment, une vitesse moyenne de chauffage V_C inférieure à 1°C/s conduirait à une durée trop longue du chauffage entre 600°C et Ac1, donc à une formation trop
20
importante de ferrite et à une résistance mécanique trop faible.

Au contraire, une vitesse moyenne de chauffage V_C supérieure à 20°C/s conduirait à un temps de chauffe entre 600°C et Ac1 trop faible, et à une croissance insuffisante des grains ferritiques lors du chauffage entre 600°C et Ac1.

Or, les inventeurs ont mis en évidence que la taille des grains ferritiques obtenus à
25
l'issue du chauffage entre 600°C et Ac1 a une influence sur la taille des grains d'austénite à l'issue de l'austénisation. Une croissance insuffisante des grains ferritiques entraîne en effet une formation d'une fraction trop importante de petits grains d'austénite, donc une formation insuffisante de martensite auto-revenue à l'issue du recuit, c'est à dire inférieure à 40%, en raison de l'abaissement de la valeur de la température M_s .

30 On chauffe ensuite la tôle laminée à froid depuis la température Ac1 jusqu'à une température de recuit T_m comprise entre 780°C et (Ac3-25°C)

La température Ac3 peut être mesurée par dilatométrie ou calculée selon la formule :
Ac3= 912 - 370- 27,4 Mn +27,3Si -6,35 Cr -32,7 Ni +95,2 V +190Ti +72 Al +64,5 Nb
+5,57 W +332 S +276 P+ 485 N -900B +16,2 C Mn +32,3 C Si +15,4 C Cr+ 48 C Ni +4,32
35 Si Cr - 17,3 Si Mo -18,6 Si Ni +4,8 Mn Ni +40,5 Mo V+ 174 C²+ 2,46 Mn² -6,86 Si² +0,322
Cr²+ 9,9 Mo² +1,24 Ni² -60,2 V².

Dans cette formule, la température Ac_3 est exprimée en degrés Celsius, et les teneurs élémentaires de la composition sont exprimées en pourcentages en poids.

Lorsque la température T_m est inférieure à $780^{\circ}C$, la densité de précipités de (Ti, Nb, Mo)(CN) est telle que le durcissement peut induire une augmentation de R_m au delà de la valeur de 1320 MPa et à une moindre aptitude au formage.

Lorsque la température T_m est supérieure à $(Ac_3 - 25^{\circ}C)$, la taille de grain austénitique croît de façon de trop importante si bien que l'on forme une quantité excessive de bainite inférieure et de martensite autorevenue, au détriment de la martensite fraîche et qu'il n'est plus possible d'atteindre une résistance R_m de 1180 MPa.

On maintient la tôle laminée à froid à la température T_m pendant une durée D_m comprise entre 30 et 150 secondes.

La durée D_m est choisie de telle sorte que la fraction des grains austénitiques dont la taille est inférieure à un micromètre représente de 40 à 60% de la population totale des grains austénitiques. Une durée de maintien D_m inférieure à 30s conduirait à la formation à l'issue du procédé d'une proportion trop importante de ferrite. La taille des grains austénitiques conditionne la cinétique de transformation de phase lors du refroidissement suivant le recuit. Notamment, les grains austénitiques de faible taille, inférieure à un micromètre, contribuent à abaisser la valeur de la température M_s et ainsi à diminuer la formation de martensite auto-revenue.

Le chauffage de la tôle laminée à froid à une vitesse moyenne de chauffage V_c comprise entre $1^{\circ}C/s$ et $20^{\circ}C/s$ entre $600^{\circ}C$ et la température Ac_1 , suivi du chauffage de la tôle laminée à froid entre Ac_1 et T_m et du maintien de la tôle laminée à froid à la température T_m pendant la durée D_m comprise entre 50 et 100 secondes permet ainsi de contrôler la taille des grains d'austénite formés, et plus particulièrement de contrôler la fraction de ces grains dont la taille est inférieure à un micromètre.

Ces paramètres de chauffage permettent d'obtenir la microstructure selon l'invention à l'issue du recuit et contribuent ainsi à l'obtention des caractéristiques mécaniques désirées.

Dans le cas d'une tôle destinée à être galvanisée ultérieurement, la tôle d'acier est ensuite refroidie à une vitesse V_{R1} comprise entre 10 et $150^{\circ}C/s$ jusqu'à une température T_e comprise entre $400^{\circ}C$ et $490^{\circ}C$. La vitesse de refroidissement doit être supérieure à $10^{\circ}C/s$ afin de former moins de 5% de ferrite et de ne pas former trop de bainite à faible quantité de carbures.

Dans le cas de la fabrication d'une tôle nue, la tôle d'acier est refroidie à une vitesse V_{R2} comprise entre 10 et $100^{\circ}C/s$ jusqu'à une température T_e comprise entre $400^{\circ}C$ et $490^{\circ}C$.

Le refroidissement peut être effectué à partir de la température T_m en une seule ou en plusieurs étapes et peut faire intervenir dans ce dernier cas différents modes de refroidissement tels que des bains d'eau froide ou bouillante, des jets d'eau ou de gaz.

On maintient alors la tôle à la température T_e pendant une durée D_e comprise entre 5 et 150 secondes.

Une transformation partielle de l'austénite en bainite à faible quantité de carbures intervient à ce stade. Le maintien à T_e doit être inférieur à 150s de façon à limiter la proportion surfacique de bainite et obtenir ainsi une proportion suffisante de martensite.

Les étapes suivantes du procédé diffèrent selon que l'on fabrique une tôle d'acier galvanisée en continu, notamment galvanisée-alliée, ou non revêtue.

Selon un premier mode de réalisation, correspondant à la fabrication d'une tôle d'acier galvanisée en continu, on revêt la tôle par passage en continu en immersion dans un bain de zinc ou en alliage de zinc à une température T_{Zn} comprise entre 450°C et 480°C, pendant quelques secondes. Les températures T_e et T_{Zn} sont telles que $0^\circ\text{C} \leq (T_e - T_{Zn}) \leq 10^\circ\text{C}$.

On refroidit ensuite le produit galvanisé jusqu'à la température ambiante en transformant une grande fraction de l'austénite restante en martensite fraîche et/ou en bainite inférieure.

Dans le cas où l'on souhaite fabriquer une tôle d'acier laminée à froid, recuite et galvanisée-alliée (« galvannealed »), on chauffe le produit galvanisé immédiatement à la sortie du bain de zinc ou d'alliage de zinc à une température T_G comprise entre 490 et 550°C pendant une durée t_G comprise entre 10 et 40s. On provoque ainsi l'interdiffusion du fer et de la fine couche de zinc ou d'alliage de zinc déposée lors de l'immersion, ce qui permet d'obtenir une tôle galvanisée-alliée.

On refroidit ensuite la tôle galvanisée-alliée jusqu'à la température ambiante en transformant une grande fraction de l'austénite restante en martensite fraîche et/ou en bainite inférieure.

Selon un deuxième mode de réalisation, correspondant à la fabrication d'une tôle d'acier non revêtue, on effectue à partir de la température T_e un refroidissement de la tôle jusqu'à la température ambiante.

Selon un troisième mode de réalisation, correspondant à la fabrication d'une tôle d'acier revêtue par un procédé sous vide, on effectue comme pour le deuxième mode de réalisation, à partir de la température T_e , un refroidissement de la tôle jusqu'à la température ambiante, puis on effectue un dépôt sous vide d'un revêtement en zinc ou en alliage de zinc, par exemple par dépôt physique en phase vapeur (PVD) ou par une méthode de type « Jet Vapour Deposition » (JVD)

Dans tous les modes de réalisation décrits ci-dessus, on obtient de la sorte une tôle d'acier laminée à froid et recuite contenant en proportion surfacique, une somme de 40 à 70% de martensite et de bainite inférieure, de 15 à 45% de bainite à faible quantité de carbures, de 5 à moins de 20% de ferrite, et moins de 5% d'austénite résiduelle sous forme d'îlots.

Les inventeurs ont mis en évidence que la mise en œuvre de ce procédé permet d'obtenir une tôle d'acier présentant une résistance mécanique comprise entre 1180 et 1320 MPa, conjointement avec une limite d'élasticité comprise entre 750 et 970 MPa (avant toute opération de skin-pass), un allongement à rupture d'au moins 7%, voire 8%, dont le rapport d'expansion de trou Ac% est supérieur ou égal à 20%.

En outre, la mise en œuvre de ce procédé permet d'assurer à la tôle un angle de pliage d'au moins 40° lorsque la tôle a une épaisseur comprise entre 0,7 mm et 2mm.

Par ailleurs, la tôle obtenue présente une bonne aptitude au soudage au moyen des procédés d'assemblage usuels tels que le soudage par résistance par points.

A titre d'exemple non limitatif, les résultats suivants vont montrer les caractéristiques avantageuses conférées par l'invention.

On a approvisionné des demi-produits d'acier dont les compositions, exprimées en teneurs pondérales (%) sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous.

Outre les aciers I1 à I3 ayant servi à la fabrication de tôles selon l'invention, on a indiqué à titre de comparaison la composition d'aciers R1 à R5 ayant servi à la fabrication de tôles de référence.

On a mesuré par dilatométrie, ou calculé la température Ac3 au moyen de la formule mentionnée ci-dessus et rapporté ces valeurs dans le tableau 1.

	C %	Mn %	Si %	Cr %	Ti %	B %	Al %	Mo %	Nb %	N %	S %	P %	Ca %	Ac3 (°C)
I1	0,099	2,67	0,384	0,294	0,031	0,0018	0,127	0,088	0,024	0,004	0,003	0,015	<0,003	853
I2	0,09	2,69	0,313	0,3	0,028	0,002	0,153	0,09	0,024	0,004	0,003	0,010	<0,003	855
I3	0,107	2,69	0,338	0,3	0,035	0,002	0,133	0,09	0,025	0,007	0,003	0,015	<0,003	844
R1	<u>0,134</u>	<u>2,515</u>	0,536	<u>0,574</u>	<u>0,043</u>	<u>0,0045</u>	0,017	<u>0,002</u>	0,031	0,006	0,003	0,015	<0,003	838
R2	<u>0,086</u>	<u>2,492</u>	0,309	<u>0,519</u>	0,040	<u>0,0039</u>	0,028	<u>0,003</u>	0,028	0,005	0,003	0,015	<0,003	830
R3	<u>0,087</u>	<u>2,584</u>	0,310	<u>0,520</u>	0,039	<u>0,0038</u>	0,025	<u>0,003</u>	0,034	0,005	0,003	0,015	<0,003	830
R4	<u>0,079</u>	<u>2,52</u>	0,251	0,310	0,022	0,002	0,150	0,09	0,024	0,004	0,003	0,010	<0,003	853
R5	<u>0,117</u>	<u>2,245</u>	0,507	<u>0,515</u>	0,029	<u>0,0035</u>	0,029	<u>0,002</u>	<u>0,018</u>	0,005	0,003	0,015	<0,003	830

Tableau 1- Compositions d'aciers- Température Ac3

Valeurs soulignées : non-conformes à l'invention.

Des demi-produits coulés correspondant aux compositions ci-dessus ont été réchauffés à une température T_R supérieure à 1250°C, puis laminés à chaud, la température de fin de laminage étant égale à 850°C, supérieure à Ar_3 pour tous ces aciers.

Les tôles laminées à chaud ont été refroidies en évitant la formation de ferrite et de perlite, puis bobinées à une température de 545°C. Les tôles ont ensuite été laminées à froid jusqu'à une épaisseur de 1,4 mm.

Dans un premier ensemble d'essais, des tôles I1 ont été ensuite chauffées avec une vitesse de chauffage V_C , entre 600°C et Ac_1 , Ac_1 désignant la température de début de transformation austénitique au chauffage, puis ensuite de Ac_1 jusqu'à une température T_m et maintenues à la température T_m pendant une durée D_m .

Les tôles ont été refroidies à une vitesse V_{R1} jusqu'à une température T_e , puis maintenues à la température T_e pendant une durée D_e .

Lors d'un essai particulier (I1F), la tôle I1 a été réchauffée jusqu'à 810°C, maintenue pendant 120s à cette température, puis refroidie par trempe à l'eau avec une vitesse supérieure à 100°C/s jusqu'à la température ambiante, c'est-à-dire sans étape de maintien à la température T_e .

Ces essais ont été réalisés selon différentes conditions de traitement (A à H), indiquées dans le tableau 2. Dans ce tableau, « n.a. » signifie : non applicable. En effet, selon le traitement F, aucun maintien à une température T_e n'est effectué si bien qu'on ne peut donc définir un temps de maintien D_e pertinent.

Selon un second ensemble d'essais, les nuances R1-R5 ont été traitées selon des conditions définies au tableau 3.

Les tôles fabriquées dans toutes les conditions ci-dessus ont été ensuite revêtues par revêtement au trempé en continu dans un bain de zinc à 460°C puis chauffées immédiatement à 510°C de façon à obtenir un revêtement galvanisé-allié.

Traitement	V _C entre 600 et Ac1 (°C/s)	T _m (°C)	D _m (s)	V _{R1} (°C/s)	Te (°C)	De (s)
A	2	810	120	30	460	130
B	2	<u>830</u>	120	30	460	130
C	6	820	60	26	470	33
D	<u>0,2</u>	810	<u>2</u>	26	460	33
E	<u>0,2</u>	810	60	26	460	33
F	2	810	120	>100°C/s	<u>20</u>	n.a.
G	2	780	<u>2</u>	26°C/s	460	33
H	2	<u>760</u>	120	18	470	100

Tableau 2 : Conditions d'essais réalisées sur la nuance I1
Valeurs soulignées : non-conformes à l'invention.

Traitement	V _C entre 600 et Ac1 (°C/s)	T _m (°C)	D _m (s)	V _{R1} (°C/s)	Te (°C)	De (s)
A	2	810	120	30	460	130
B	2	830	120	30	460	130
C	6	820	60	26	470	33
I	8	805	50	30	470	40
J	2	780	140	18	460	120

5

Tableau 3 : Conditions d'essais réalisées sur les nuances I2, I3 et R1 à R5

On a déterminé les caractéristiques mécaniques des tôles ainsi obtenues, résultant de la composition d'acier et du traitement thermique. Par convention, les tôles ont été repérées en associant la dénomination de la composition chimique et du traitement thermique : ainsi I1A désigne la tôle obtenue à partir de la composition I1 sur laquelle on a appliqué les conditions du traitement thermique A.

10

Au moyen d'essais de traction, on a déterminé la limite d'élasticité Re, la résistance à la rupture Rm et l'allongement total At des tôles obtenues par ces différents

modes de fabrication. On a également déterminé l'aptitude au pliage de ces tôles en déterminant l'angle maximal avant rupture.

Cet angle est déterminé en appliquant un poinçon sur les tôles de manière à plier celles-ci. La force à appliquer pour réaliser le pliage croît jusqu'à la rupture. La mesure de la force appliquée lors du pliage permet ainsi de détecter l'amorçage de la rupture de la tôle, et de mesurer l'angle maximal de pliage lorsque cette rupture intervient.

On a par ailleurs déterminé le rapport d'expansion de trou Ac% de chaque tôle en effectuant un trou de 10 mm de diamètre par découpe dans la tôle, puis au moyen d'un outil tronconique en réalisant une expansion au niveau des bords de ce trou. Comme décrit dans la norme ISO 16630:2009, on a mesuré le diamètre initial D_i du trou avant emboutissage, puis le diamètre final D_f du trou après emboutissage, au moment où l'on observe des fissures traversantes dans l'épaisseur de la tôle sur les bords du trou. On a déterminé l'aptitude à l'expansion de trou Ac% selon la formule suivante :

$$Ac\% = 100 * \frac{D_f - D_i}{D_i}.$$

On a également déterminé les caractéristiques de la microstructure des aciers. Les fractions surfaciques de martensite (incluant la martensite auto-revenue et la martensite fraîche) et de bainite inférieure (conjointement), de martensite auto-revenue et de bainite inférieure (conjointement), et de bainite à faible quantité de carbures ont été quantifiées sur des coupes polies soumises à une attaque au bisulfite de sodium. La fraction surfacique de martensite fraîche a été quantifiée après attaque par un réactif NaOH-NaNO₃.

On a également déterminé la fraction surfacique de ferrite grâce à des observations en microscopie optique et électronique à balayage où l'on a identifié la phase ferritique.

On a également observé la nature, la taille et la densité des précipités sur lame mince en microscopie électronique à transmission.

Les détails concernant les microstructures des tôles ont été portés au tableau 4 ci-dessous.

	(Martensite + bainite inférieure) (%)	(Martensite auto-revenue + bainite inférieure) (%)	Martensite fraîche (%)	Bainite à faible quantité de carbures (%)	Austénite (%)	Ferrite (%)	Fraction de grains austénitiques dont la taille est <1 micron	densité de (Ti,Nb,Mo)(C N) de taille <5 nm < 10000/μ ³ ?
I1A	50	5	45	43	0	7	50	Oui
I1B	40	10	30	<u>57</u>	0	<u>3</u>	<u>15</u>	Oui
I1C	60	45	15	25	0	15	n.d.	Oui
I1D	<u>22</u>	<u>2</u>	20	38	0	<u>40</u>	10	Oui
I1E	<u>25</u>	5	20	35	0	<u>40</u>	10	Oui
I1F	<u>93</u>	<u>78</u>	15	<u>0</u>	2	5	50	Oui
I1G	40	<u>3</u>	37	35	0	<u>25</u>	<u>70</u>	Oui
I1H	40	<u>0</u>	40	25	2	<u>33</u>	<u>80</u>	<u>Non</u>
I2J	40	5	35	45	0	15	60	Oui
I3I	70	30	40	15	0	15	55	Oui
R1B	<u>95</u>	<u>81</u>	<u>14</u>	<u>3</u>	0	<u>2</u>	5	Oui
R2B	60	30	30	40	0	<u>0</u>	10	Oui
R3B	<u>75</u>	45	30	25	0	<u>0</u>	10	Oui
R3C	60	30	30	38	0	<u>2</u>	15	Oui
R4J	<u>25</u>	<u>0</u>	25	40	0	<u>35</u>	60	Oui
R5B	<u>50</u>	25	25	<u>50</u>	0	<u>0</u>	5	Oui
R5C	45	23	22	<u>47</u>	0	8	<u>7</u>	Oui

Tableau 4 – Caractéristiques microstructurales des tôles obtenues

Valeurs soulignées : non-conformes à l'invention.

n.d. : non déterminé

Les propriétés mécaniques des tôles ont été portées au tableau 5 ci-dessous.

	Re (MPa)	Rm (MPa)	At (%)	Angle de pliage (°)	Ac%
I1A	793	1210	7,5	57	20
I1B	803	<u>1166</u>	8	n.d.	25
I1C	803	1253	9,5	60	n.d.
I1D	<u>621</u>	<u>1063</u>	9,2	n.d.	25
I1E	<u>636</u>	<u>1069</u>	9,2	n.d.	25
I1F	<u>1054</u>	<u>1370</u>	<u>6,7</u>	n.d.	37
I1G	756	1237	10,1	n.d.	<u>18</u>
I1H	856	<u>1327</u>	7,5	n.d.	<u>15</u>
I2J	763	1206	11	25	22
I3 I	770	1270	8,1	44	21
R1B	930	<u>1353</u>	7,3	56	43,9
R2B	800	<u>1116</u>	8	71	n.d.
R3B	821	<u>1131</u>	7,6	56	n.d.
R3C	798	<u>1165</u>	8,6	n.d.	37
R4J	<u>669</u>	<u>1095</u>	13,4	63	28
R5B	790	<u>1151</u>	<u>6,7</u>	63	n.d.
R5C	<u>720</u>	<u>1137</u>	10,4	n.d.	30

Tableau 5 - Propriétés mécaniques des tôles obtenues

n.d : non déterminé.

5 On met ainsi en évidence les relations entre les compositions des aciers, leur microstructure et leurs propriétés mécaniques.

Les tôles d'acier selon l'invention présentent une composition et une microstructure qui permettent d'obtenir une résistance mécanique, une limite d'élasticité, un allongement, un angle de pliage et un rapport d'expansion de trou qui satisfont aux valeurs visées.

10

Les Figures 1 et 2 illustrent la microstructure de l'exemple I1A. La Figure 1 montre le résultat d'une attaque de la tôle par bisulfite de sodium, tandis que la Figure 2 illustre le

résultat de l'attaque de la tôle par le réactif NaOH-NaNO₃. La Figure 1 fait apparaître la martensite auto-revenue et la bainite inférieure (M+BI), ainsi que la bainite à faible quantité de carbures (BFC). La Figure 2 fait apparaître, sous forme de zones plus sombres, la martensite fraîche (MF).

5 Dans l'essai I1A, les observations en MET (figure 3) révèlent la présence de carbonitrides (Ti, Nb, Mo)(CN) d'une taille moyenne de 7 nm, en quantité inférieure à 10000 précipités/ μm^3 , si bien que l'ensemble des propriétés mécaniques désirées est atteint. Ces observations mettent également en évidence la présence de carbures sous forme de bâtonnets orientés dans les directions $\langle 111 \rangle$ dans les lattes de martensite auto-revenue et de bainite inférieure. La bainite à faible quantité de carbures contient moins de 100 carbures par unité de surface de 100 micromètres carrés.

10 Dans l'essai I1B, la température de recuit T_m est trop proche de AC_3 , ce qui conduit à une faible quantité de carbone dans l'austénite. Il se forme trop de bainite à faible quantité de carbures pendant le refroidissement et le maintien à la température T_e . Ceci se traduit par une résistance mécanique trop faible.

15 Dans les essais I1D et I1E, la vitesse de chauffage V_c est trop faible. Ainsi, on observe une croissance trop importante des grains de ferrite. Il subsiste ainsi dans l'acier une quantité trop importante de ferrite et il n'y a pas assez de martensite ou de bainite inférieure. La résistance mécanique R_m n'est donc pas atteinte même pour des temps de maintien D_m de 60s comme c'est le cas pour l'exemple I1E.

20 Dans l'essai I1F la vitesse de refroidissement V_R est trop élevée. Ainsi, il se forme trop de martensite et de bainite inférieure, et pas assez de bainite à faible quantité de carbures et de martensite fraîche. La résistance mécanique et la limite d'élasticité sont donc bien au-delà de celles visées tandis que l'allongement est trop faible.

25 Le temps de maintien D_m à température T_m du traitement G est trop court si bien que la tôle produite suivant la condition I1G présente un taux de recristallisation de la ferrite inférieur à 15%. Ceci génère une structure en bandes qui conduit à une faible valeur d'expansion de trou.

30 Dans l'essai I1H, la température de recuit trop faible conduit à une trop grande densité de précipités de petite taille : les observations en MET (figure 4) font apparaître une taille moyenne de 5 nm en quantité supérieure à 10000 précipités/ μm^3 si bien que la résistance mécanique excède 1320 MPa. De plus la faible température de recuit T_m ne permet pas d'atteindre un taux de recristallisation de la ferrite supérieur à 15% ce qui conduit à une valeur d'expansion de trou trop basse.

35 Dans le cas des essais I1G et I1H, la fraction de grains austénitiques dont la taille est inférieure à 1 μm est trop importante, ce qui induit une température M_s trop basse, et

donc la formation d'une quantité de bainite inférieure plus martensite auto-revenue trop faible. Ceci contribue à diminuer l'expansion de trou qui est trop faible pour ces deux essais.

La tôle selon l'exemple R1B présente des teneurs en C, Cr, Ti et B trop élevées, de telle sorte que sa résistance mécanique R_m est trop élevée malgré une quantité de Mo trop faible. Ainsi, bien que l'on obtienne une limite d'élasticité R_e satisfaisante, celle-ci d'élasticité est obtenue conjointement avec une résistance mécanique R_m trop élevée.

Les tôles selon les essais R2B, R3B et R3C contiennent des teneurs en C et Mn et Mo trop faibles, et ne présentent ainsi pas une résistance mécanique satisfaisante bien que les quantités de B et Cr soient très élevées.

L'exemple R5 présente une teneur en Mn trop faible, ce qui conduit à une formation trop importante de bainite à faible quantité de carbures selon les traitements B et C.

Les tôles d'aciers selon l'invention seront utilisées avec profit pour la fabrication de pièces de structures ou de sécurité dans l'industrie automobile.

REVENDEICATIONS

1.- Tôle d'acier laminée à froid et recuite d'épaisseur comprise entre 0,7 mm et 2mm, de résistance mécanique comprise entre 1180 MPa et 1320 MPa, dont le rapport d'expansion de trou Ac% est supérieur à 20% et l'angle de pliage supérieur ou égal à 40°, dont la composition chimique comprend, les teneurs étant exprimées en poids :

$$0,09 \leq C \leq 0,11 \%$$

$$2,6 \leq Mn \leq 2,8\%$$

$$0,20 \leq Si \leq 0,55\%$$

$$0,25 \leq Cr < 0,5 \%$$

$$0,025 \leq Ti \leq 0,040 \%$$

$$0,0015 \leq B \leq 0,0025 \%$$

$$0,005 \leq Al \leq 0,18 \%$$

$$0,08 \leq Mo \leq 0,15 \%$$

$$0,020 \leq Nb \leq 0,040\%$$

$$0,002 \leq N \leq 0,007 \%$$

$$0,0005\% \leq S \leq 0,005\%$$

$$0,001\% \leq P \leq 0,020\%,$$

$$Ca \leq 0,003\%$$

le reste étant constitué de fer et d'impuretés inévitables provenant de l'élaboration, la tôle ayant une microstructure constituée de martensite et/ou de bainite inférieure, ladite martensite comprenant de la martensite fraîche et/ou de la martensite auto-revenue, la somme des proportions surfaciques de martensite et de bainite inférieure étant comprise entre 40 à 70%, de 15 à 45% en proportion surfacique de bainite à faible quantité de carbures, de 5 à moins de 20% en proportion surfacique de ferrite, la fraction de ferrite non recristallisée par rapport à la fraction de ferrite totale, étant inférieure à 15%, et de moins de 5% en proportion surfacique d'austénite résiduelle sous forme d'îlots, la fraction des anciens grains austénitiques dont la taille est inférieure à moins de un micromètre représentant de 40 à 60% de la population totale desdits anciens grains austénitiques.

2.- Tôle d'acier selon la revendication 1, caractérisée en ce que ladite microstructure comprend en proportion surfacique de 15 à 45% de martensite fraîche.

3.- Tôle d'acier selon la revendication 1, caractérisée en ce que ladite microstructure comprend en proportion surfacique de 5 à 50% de somme de martensite auto-revenue et de bainite inférieure.

4- Tôle d'acier selon la revendication 3, caractérisée en ce que ladite martensite auto-revenue et ladite bainite inférieure contiennent des carbures sous forme de bâtonnets orientés dans les directions $\langle 111 \rangle$ des lattes martensitiques et bainitiques.

5

5.- Tôle d'acier selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que ladite bainite à faible quantité de carbures contient moins de 100 carbures par unité de surface de 100 micromètres carrés.

10

6- Tôle d'acier selon l'une quelconque des caractéristiques 1 à 5, caractérisée en ce qu'elle contient des précipités du type (Ti, Nb, Mo)(C,N) de taille inférieure à 5 nanomètres, présents en quantité inférieure à 10 000 précipités/ μm^3 .

15

7.- Tôle d'acier selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que la composition chimique comprend, la teneur étant exprimée en poids :

$$2,6 \leq \text{Mn} \leq 2,7\%.$$

20

8.- Tôle d'acier selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisée en ce que la composition chimique comprend, la teneur étant exprimée en poids :

$$0,30 \leq \text{Si} \leq 0,5\%.$$

25

9.- Tôle d'acier selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisée en ce que la composition chimique comprend, la teneur étant exprimée en poids :

$$0,005 \leq \text{Al} \leq 0,030\%.$$

30

10.- Tôle d'acier selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisée en ce que ladite tôle comporte un revêtement de zinc ou d'alliage de zinc, obtenu au trempé.

11.- Tôle d'acier selon la revendication 10, caractérisé en ce que ledit revêtement de zinc ou d'alliage de zinc est un revêtement galvanisé-allié, ledit revêtement de zinc ou d'alliage de zinc comprenant de 7 à 12% en poids de fer.

35

12.- Tôle d'acier selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisée en ce que ladite tôle comporte un revêtement de zinc ou d'alliage de zinc, obtenu par dépôt sous vide.

13.- Procédé de fabrication d'une tôle laminée à froid et recuite selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, comprenant les étapes successives suivantes :

- on approvisionne un demi-produit dont la composition chimique comprend, les teneurs étant exprimées en poids :

5	$0,09 \leq C \leq 0,11 \%$
	$2,6 \leq Mn \leq 2,8\%$
	$0,20 \leq Si \leq 0,55\%$
	$0,25 \leq Cr < 0,5 \%$
	$0,025 \leq Ti \leq 0,040 \%$
10	$0,0015 \leq B \leq 0,0025 \%$
	$0,005 \leq Al \leq 0,18 \%$
	$0,08 \leq Mo \leq 0,15 \%$
	$0,020 \leq Nb \leq 0,040\%$
	$0,002 \leq N \leq 0,007 \%$
15	$0,0005\% \leq S \leq 0,005\%$
	$0,001\% \leq P \leq 0,020\%,$
	$Ca \leq 0,003\%$

le reste étant constitué de fer et d'impuretés inévitables provenant de l'élaboration, puis

- on chauffe ledit demi-produit à une température T_r supérieure ou égale à 1250°C, puis
- on lamine à chaud ledit demi-produit, la température de fin de laminage étant supérieure à la température Ar_3 de début de transformation de l'austénite au refroidissement, pour obtenir une tôle laminée à chaud, puis
- on refroidit ladite tôle laminée à chaud à une vitesse supérieure à 30°C/s pour éviter la formation de ferrite et de perlite, puis
- on bobine ladite tôle laminée à chaud à une température comprise entre 580° et 500°C, puis
- on lamine à froid ladite tôle laminée à chaud pour obtenir une tôle laminée à froid, puis
- on réchauffe ladite tôle laminée à froid entre 600°C et Ac_1 , Ac_1 désignant la température de début de transformation austénitique au chauffage, avec une vitesse de réchauffage V_c comprise entre 1 et 20°C/s, puis
- on porte ladite tôle laminée à froid jusqu'à une température T_m comprise entre 780°C et ($Ac_3-25^\circ C$), et on maintient à ladite température T_m ladite tôle laminée à froid pendant une durée D_m comprise entre 30 et 150 secondes, étant entendu que Ac_3 désigne la température de fin de transformation austénitique au chauffage, puis

- on refroidit la tôle à une vitesse VR1 comprise entre 10 et 150°C/s jusqu'à une température Te comprise entre 400 et 490°C, puis

- on maintient la tôle à la température Te pendant une durée De comprise entre 5 et 150 secondes, puis

5 - on revêt la tôle par passage en continu en immersion dans un bain de zinc ou en alliage de zinc à une température TZn comprise entre 450°C et 480°C, lesdites températures Te et TZn étant telles que $0 \leq (Te - TZn) \leq 10^\circ\text{C}$, de façon à obtenir une tôle revêtue, puis

10 - on réchauffe optionnellement ladite tôle revêtue à une température TG comprise entre 490°C et 550°C pendant une durée tg comprise entre 10 s et 40 s.

14.- Procédé de fabrication d'une tôle laminée à froid et recuite selon l'une quelconque des revendications 1 à 9 et 12, comprenant les étapes successives suivantes :

15 - on approvisionne un demi-produit dont la composition chimique comprend, les teneurs étant exprimées en poids :

$$0,09 \leq C \leq 0,11 \%$$

$$2,6 \leq \text{Mn} \leq 2,8\%$$

$$0,20 \leq \text{Si} \leq 0,55\%$$

20 $0,25 \leq \text{Cr} < 0,5 \%$

$$0,025 \leq \text{Ti} \leq 0,040 \%$$

$$0,0015 \leq \text{B} \leq 0,0025 \%$$

$$0,005 \leq \text{Al} \leq 0,18 \%$$

$$0,08 \leq \text{Mo} \leq 0,15 \%$$

25 $0,020 \leq \text{Nb} \leq 0,040\%$

$$0,002 \leq \text{N} \leq 0,007 \%$$

$$0,0005\% \leq \text{S} \leq 0,005\%$$

$$0,001\% \leq \text{P} \leq 0,020\%,$$

$$\text{Ca} \leq 0,003\%$$

30 le reste étant constitué de fer et d'impuretés inévitables provenant de l'élaboration, puis

- on chauffe ledit demi-produit à une température T, supérieure ou égale à 1250°C, puis

- on lamine à chaud ledit demi-produit, la température de fin de laminage étant supérieure à Ar3, pour obtenir une tôle laminée à chaud, puis

35 - on refroidit ladite tôle laminée à chaud à une vitesse supérieure à 30°C/s pour éviter la formation de ferrite et de perlite, puis

- on bobine ladite tôle laminée à chaud à une température comprise entre 580 et 500°C, puis

- on lamine à froid ladite tôle laminée à chaud pour obtenir une tôle laminée à froid, puis

5 - on réchauffe ladite tôle laminée à froid avec une vitesse de réchauffage VR, entre 600°C et Ac1, Ac1 désignant la température de début de transformation austénitique au chauffage, comprise entre 1 et 20°C/s, puis

10 - on réchauffe ladite tôle laminée à froid jusqu'à une température Tm comprise entre 780 °C et (Ac3-25°C), et on maintient à ladite température Tm ladite tôle laminée à froid pendant une durée Dm comprise entre 30 et 150 secondes, étant entendu que Ac3 désigne la température de fin de transformation austénitique au chauffage, puis

- on refroidit la tôle à une vitesse VR2 comprise entre 10 et 100°C/s jusqu'à une température Te comprise entre 400°C et 490°C, puis

15 - on maintient ladite tôle à la température Te pendant une durée De comprise entre 5 et 150 secondes, puis

- on refroidit ladite tôle jusqu'à la température ambiante.

20 15.- Procédé de fabrication d'une tôle laminée à froid, recuite et revêtue, selon la revendication 14, dans lequel on effectue en outre un revêtement de zinc ou d'alliage de zinc par dépôt sous vide après ladite étape de refroidissement jusqu'à la température ambiante.

25 16.- Procédé de fabrication d'une tôle selon la revendication 14, caractérisé en ce que ledit dépôt sous vide est effectué par dépôt physique en phase vapeur (PVD).

17.- Procédé de fabrication d'une tôle selon la revendication 14, caractérisé en ce que ledit dépôt sous vide est effectué par Jet Vapour Deposition (JVD).

30 18 – Utilisation d'une tôle d'acier selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, ou fabriquée par un procédé selon l'une quelconque des revendications 13 à 17, pour la fabrication de pièces de structures ou de sécurité pour véhicules automobiles

1/2

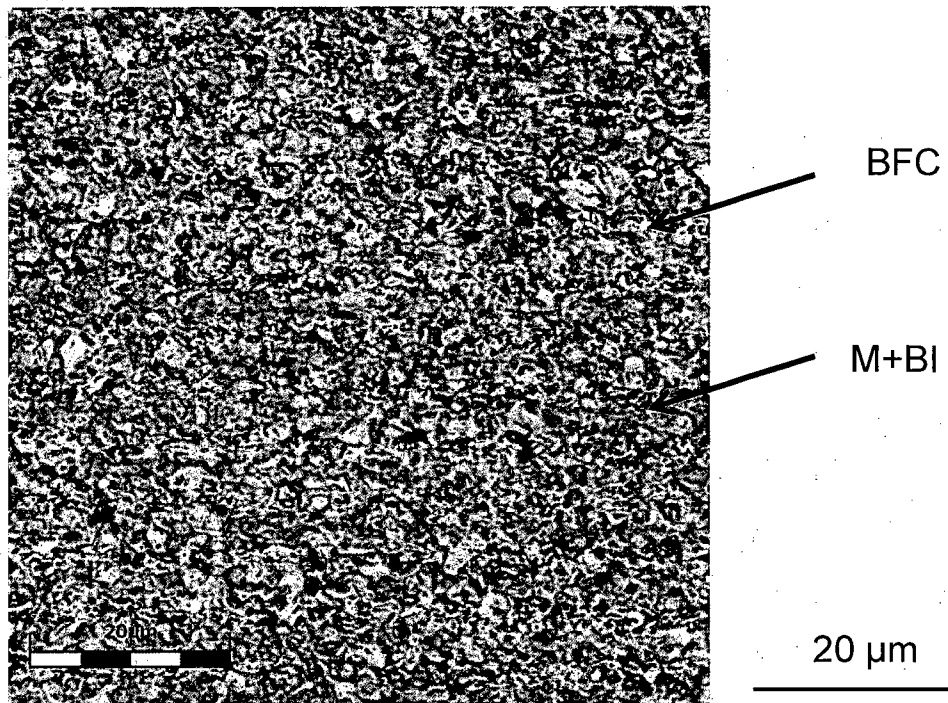


Figure 1

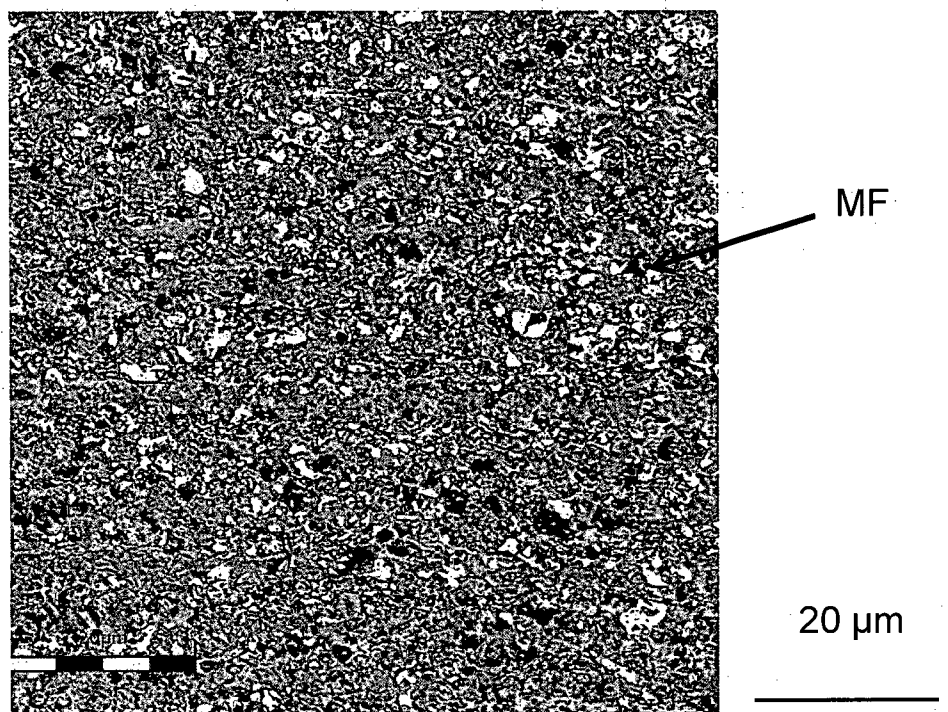


Figure 2

2/2

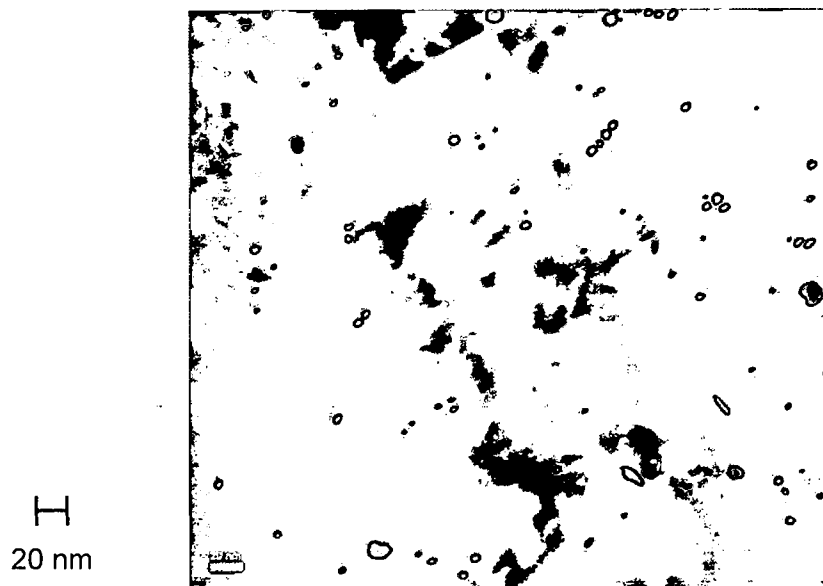


Figure 3

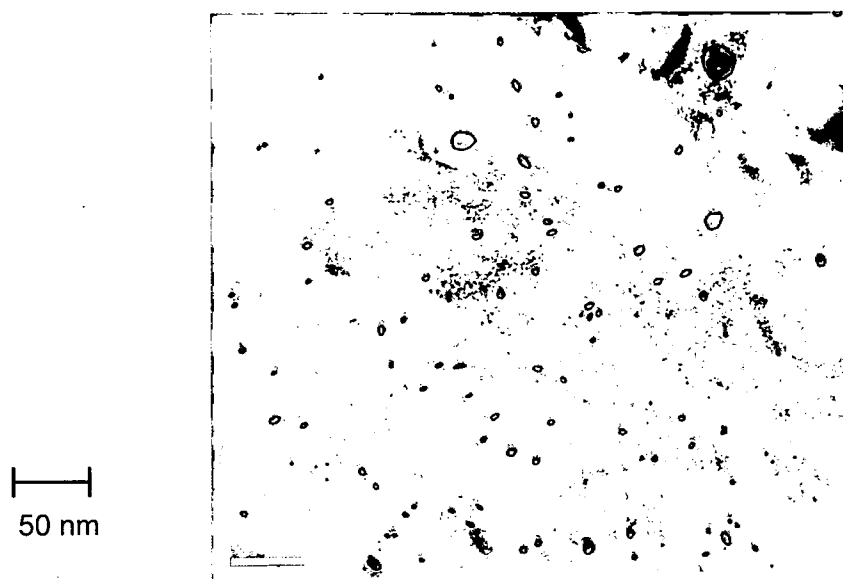


Figure 4